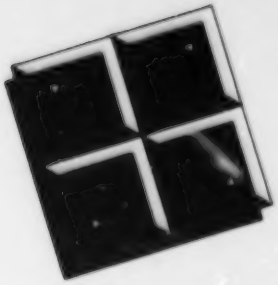
Québec



Note de recherche forestière nº 97

Système d'imagerie informatisée appliqué au développement des racines de semis d'épinette

Gil Lambany* et Linda Veilleux**

FDC 160.203(047.3)(714)
LC SD 397 S77

Résumé

L'étude de l'architecture des racines de jeunes semis d'arbre est souvent consommatrice de temps et demeure souvent imprécise. Bien que couramment employée au cours des dernières années, l'étude de la masse sèche ne permet pas d'établir de distinctions précises entre les différentes racines au cours de la période de croissance. En 1997, une technique d'analyse des racines qui utilise un système informatisé de reconnaissance d'images a été évaluée. Pendant 14 semaines, on a établi les profils de longueur de 19 classes de diamètre de racines ainsi que des principales variables morphologiques (hauteur, diamètre au collet, masses sèches des tiges et des racines). L'étude indique que cette technique allie à la fois simplicité, rapidité et précision. Cependant, même si les racines sont numérisées à une haute résolution, on doit colorer les tissus afin d'identifier adéquatement les racines fines et d'accroître les contrastes. La comparaison des courbes d'élongation des 19 classes de diamètre de racines au cours de la saison de croissance indique que les deux essences étudiées présentent des particularités, caractéristique peut-être associée à des développements phénologiques distincts au cours de la saison de croissance. Pour ces deux essences, les classes de diamètre de racines variant entre 0,15 mm et 0,45 mm dominent alors que les racines fines et celles de plus gros diamètres demeurent peu importantes.

Mots-clés : racines, analyse d'images, numériseur, plants de fortes dimensions, *Picea mariana*, *Picea glauca*.

Abstract

A computerized imagery system applied to spruce seedling root development. *The study of the root architecture of tree seedlings is often time consuming and remains imprecise. Although in current use during the recent years, measuring seedling dry weights does not help to define precise distinctions between the different roots during the growing period. In 1997, a root analysis method using an image recognition computerized system was evaluated. Over a period of 14 weeks, length profiles for 19 root diameter classes were established, as well as the main morphological variables (height, collar diameter, foliar and root dry weights). The study shows that this technique combines simplicity, speed and precision. Even if roots are digitized at a high resolution, tissues must be dyed in order to adequately identify the fine roots and increase contrast. Comparison of the lengthening curves for the 19 root diameter classes during the growing season reveals that both of the studied species show peculiarities, a character possibly related to distinct phenological developments during the growing season. For both species, root diameter classes from 0.15 mm to 0.45 mm are the most important while fine roots and the larger ones are not very important.*

Key words : roots, image analysis, scanner, large seedlings, Picea mariana, Picea glauca.

* Ing.f., M.Env., anciennement de la DRF, maintenant au Service de l'aménagement forestier, Direction des programmes forestiers.
** Techn. labo. au Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie, DRF.

Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
SAINTE-FOY (Québec) G1P 3W8 Canada

Téléphone : (418) 643-7994
Télécopieur : (418) 643-2165
Courriel : rech.for@mrn.gouv.qc.ca

Introduction

En pépinière, des améliorations constantes doivent être apportées aux techniques de culture afin d'accroître la qualité des racines. Idéalement, on doit favoriser un développement horizontal de celles-ci afin de se rapprocher des conditions qu'on observe en milieu naturel (Balisky *et al.* 1995). D'autre part, le développement et la croissance des racines semblent pouvoir expliquer en partie la résistance des plantes aux stress environnementaux (Liang *et al.* 1996) ; Haase et Rose (1994) soulignent le rôle qu'exerce la biomasse radiculaire sur la capacité d'assimilation des éléments nutritifs. Biernbaum (1992) insiste particulièrement sur la compréhension du développement de la zone radiculaire afin d'améliorer la gestion des substrats, de l'eau et des pratiques de fertilisation.

Il est donc important de développer des outils de mesure précis de certains paramètres des racines afin de bien évaluer l'effet de traitements appliqués en pépinière ; notons plus particulièrement les travaux réalisés par Haase et Rose (1994) sur le volume des racines et ceux de Ludovici et Morris (1995) sur la densité de celles-ci. Tagliavini *et al.* (1993) confirment l'importance qu'ont respectivement la surface radiculaire et le diamètre des racines sur la cinétique d'absorption de l'eau et des minéraux et sur le flux ionique dans les racines. Actuellement, les méthodes d'analyse courantes des racines, abstraction faite de la masse sèche, exigent souvent des manipulations importantes, parfois destructives et qui produisent des résultats souvent imprécis (Bottomley *et al.* 1986, Brown *et al.* 1991). Les minirhizotrons, bien qu'ils permettent une analyse continue, non destructive et précise des racines (Neufeld *et al.* 1989, Pagès 1992), sont généralement peu adaptés aux études réalisées à grande échelle dans les pépinières.

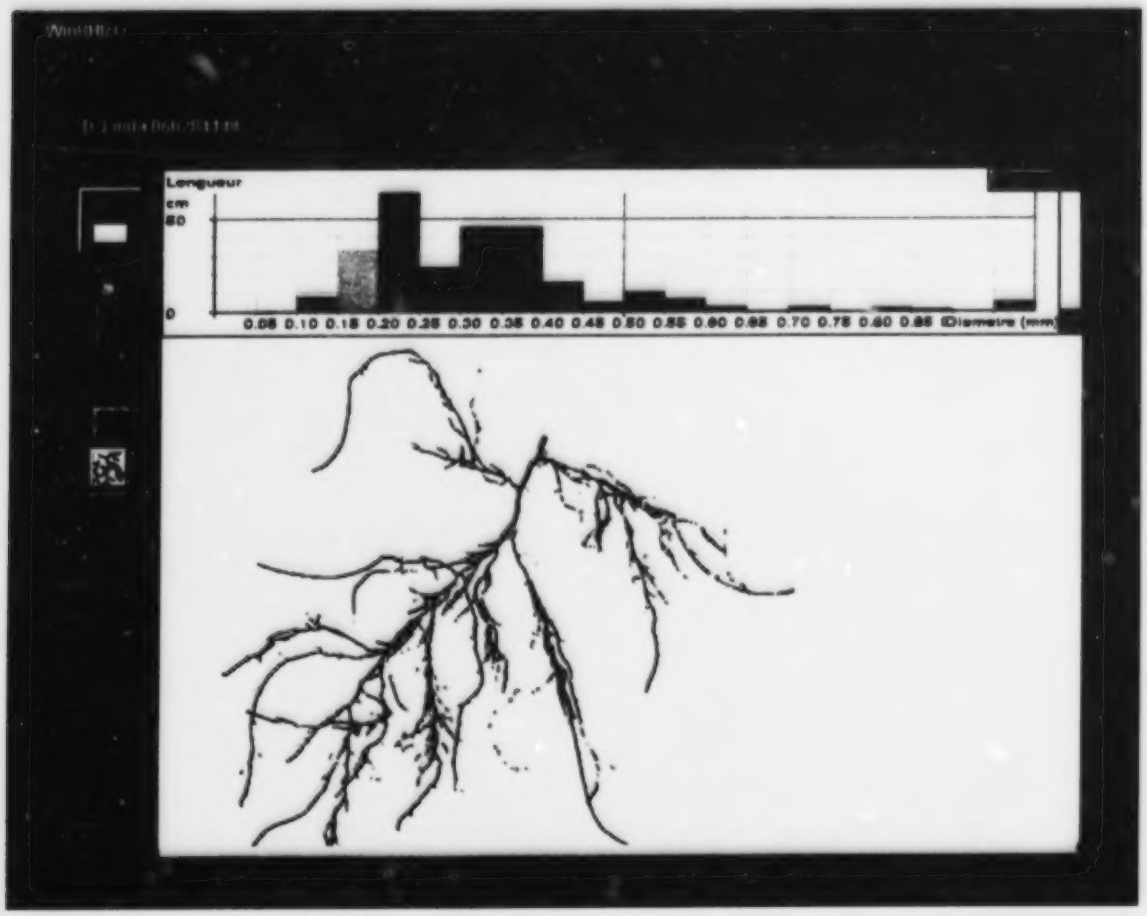


Figure 1. Image d'écran présentant un système radiculaire numérisé (bas de l'écran) et un histogramme des longueurs totales des racines mesurées en fonction de 19 classes de diamètre de racines (haut de l'écran).

Récemment, l'amélioration combinée des numériseurs et des systèmes informatisés d'analyse d'images a amené le développement de méthodes qui bien que destructrices, permettent une caractérisation rapide et précise des racines de l'oignon (*Allium cepa* L.) (Ottman et Tim 1984), du blé (*Triticum aestivum*) et de l'orge (*Hordium vulgare* L.) (Pan et Bulton 1991), de différentes souches de la bactérie *Pseudomonas* sp. (Doty *et al.* 1994) ou de différentes espèces de pin (Wilhoit *et al.* 1993). Aucune recherche connue n'a traité des semis d'arbre produits dans les pépinières du Québec.

Cette étude avait donc pour but de caractériser de façon dynamique le développement des racines de jeunes semis d'épinette blanche (*Picea glauca*) et d'épinette noire (*Picea mariana*) à l'aide d'un système intégré de numérisation et d'analyse d'images.

Matériel et méthodes

À sept reprises, à des intervalles de deux semaines entre juillet et octobre 1997, des semis ensemencés en mai ont été récoltés à l'intérieur de tunnels à la pépinière de Grandes-Piles. Chaque fois, 72 plants d'épinette blanche sont récoltés aléatoirement dans une production opérationnelle à l'intérieur de six tunnels distincts (12 plants par tunnel) ; pour l'épinette noire, 60 plants sont choisis à chaque date à l'intérieur d'un tunnel de production. Les deux essences sont produites dans des récipients à parois ajourées *IPL 25-350A* (Gingras 1999). Au laboratoire, les racines de chaque plant sont lavées individuellement et les tiges, coupées au collet. On mesure la hauteur (cm) et le diamètre au collet (mm) de chaque semis alors que les masses aériennes (mg) sont évaluées par groupe de trois. Les racines sont regroupées dans des sacs de plastique (annexe 1a). Puis, on colore et on rince individuellement le système radiculaire de chaque plant d'abord dans une solution de fuchsine 0,005 % (annexe 1b) et dans de l'eau déminéralisée (annexe 1c). Cette étape est nécessaire puisque les résultats de tests préliminaires (non présentés) indiquent qu'en l'absence de coloration, le numériseur n'identifie pas systématiquement les racines les plus fines. Les racines de chaque plant sont ensuite coupées en petites sections (annexe 1d), réparties uniformément dans un plat de plastique transparent (15 sur 15 ou 20 sur 20 cm) rempli d'eau déminéralisée (annexe 1e). Toutes les racines contenues dans le bac sont numérisées (annexe 1f) en teintes de gris à une définition de 197 pixels cm^{-1} (500 *dpi*) à l'aide d'un numériseur *Hewlett Packard Scanjet 4C/T*. Le logiciel *Winrhizo* version 3.7 analyse ensuite chaque système radiculaire (figure 1) à l'aide d'une image-seuil. Pour cette expérience, 19 classes de diamètre de racines variant de 0,05 à 0,95 mm et plus sont retenues. L'incrément retenu entre chaque classe est de 0,05 mm. Les diamètres moyens des racines sont calculés par le logiciel de la façon suivante : quotient de la surface projetée sur la longueur totale. Les données numériques sont sauvegardées dans un fichier texte alors que l'image peut être conservée dans un format TIF. Comme pour les tiges, les racines sont ensuite placées par groupe de trois dans des sacs de papier, séchées à l'étuve à 60 °C et pesées (mg). Les moyennes et les écarts types des longueurs des tiges et de leur diamètre au collet ainsi que des longueurs de chaque classe de diamètre de racines sont calculées à l'aide des données obtenues de chaque plant (EPB, n = 72, EPN, n = 60) alors que pour les masses, on les calcule avec les valeurs obtenues des sous-échantillons (EPB, n = 24, EPN, n = 20).

Résultats

1. Progression des paramètres morphologiques

La progression des hauteurs tant chez l'épinette blanche que chez l'épinette noire indique des tendances semblables : une augmentation régulière jusqu'au 18 août puis plus importante par la suite jusqu'au 1er septembre (figure 2a). À cette date, l'épinette blanche ne croît presque plus en hauteur alors que chez l'épinette noire, l'élongation se maintient, à un rythme moindre cependant. Sauf en début de saison, on observe une croissance constante du diamètre de l'épinette blanche de la fin du mois d'août à la fin de septembre et de la mi-août à la fin de septembre chez l'épinette noire (figure 2b). Les profils des masses de la partie aérienne sont semblables chez les deux essences (figure 2c). Cependant, l'augmentation apparaît plus constante chez l'épinette blanche, l'épinette noire indiquant un ralentissement entre le premier et le 15 septembre. Pour cette dernière essence, on observe une augmentation plus soutenue de la masse foliaire en fin de saison. Finalement, le début de la saison est caractérisé par une augmentation lente mais constante de la masse des racines de l'épinette blanche (figure 2d) ; chez l'épinette noire, celle-ci apparaît plus lente (figure 2d). À partir du 18 août mais surtout au début de septembre, la masse des racines de l'épinette blanche augmente rapidement, tendance qui apparaît plus tard vers le 15 septembre chez l'épinette noire. Alors que l'augmentation de la masse des racines de l'épinette blanche diminue dès le 29 septembre, elle se maintient jusqu'à la fin de la saison chez l'épinette noire.

2. Longueur des racines

Pour alléger le texte, chaque classe de diamètre de racine est identifiée par le premier chiffre seul ; ainsi, la classe 0,05 mm – 0,10 mm est appellée : 0,05 mm.

2.1 L'épinette blanche

Globalement, on peut dégager, malgré l'importance des écarts types (annexe 2), trois groupes distincts pour les diamètres s'échelonnant de 0,05 mm à 0,45 mm (figure 3a). En premier lieu, on observe que les racines les plus fines (0,05 mm et 0,10 mm) présentent une élongation lente tout au cours de la saison. Ces deux classes demeurent les moins importantes en longueurs de racines produites.

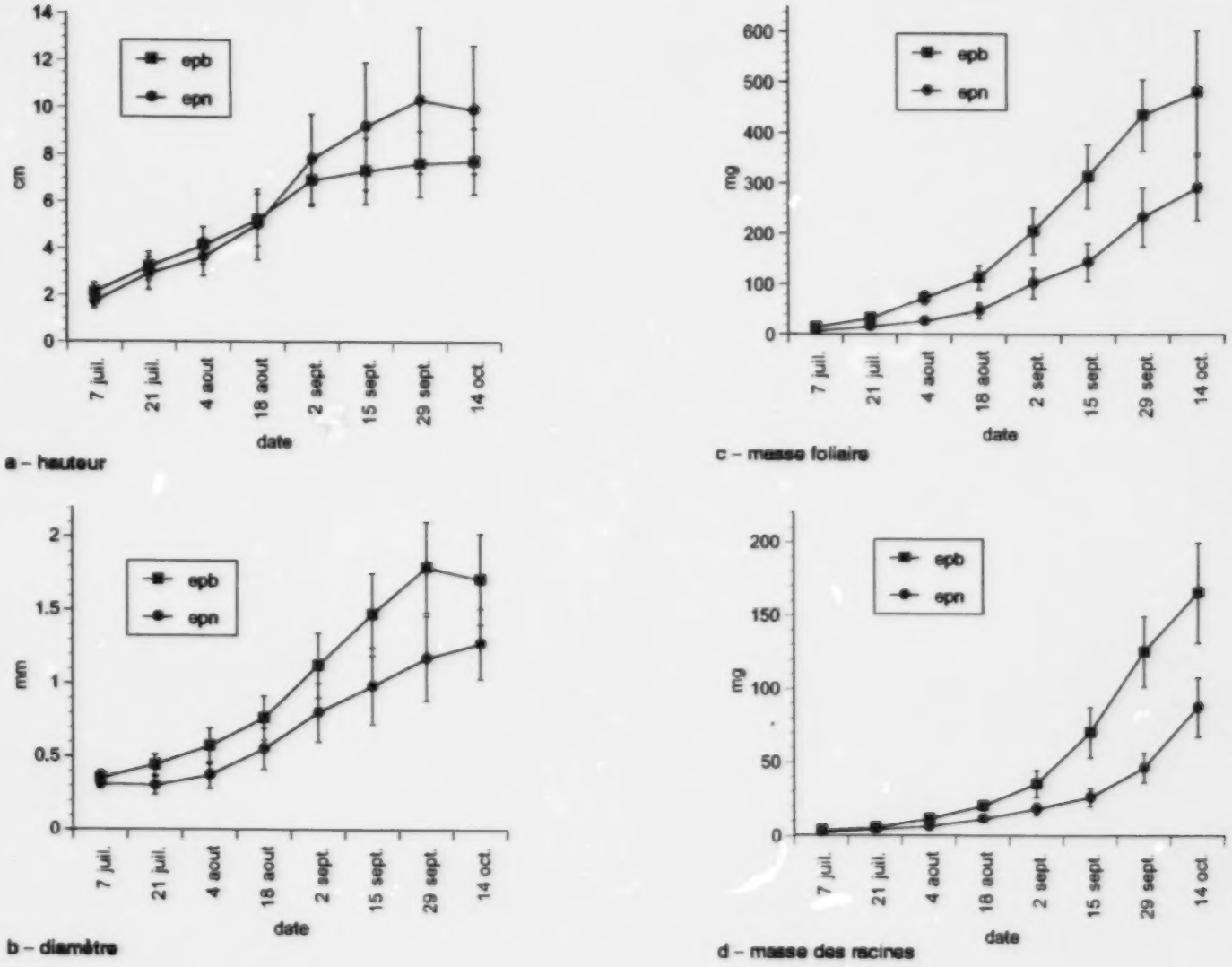
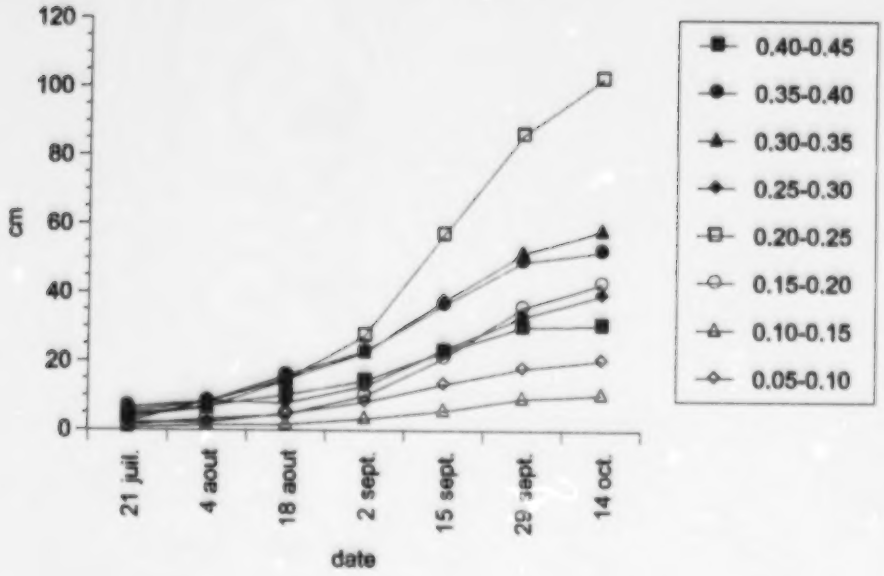
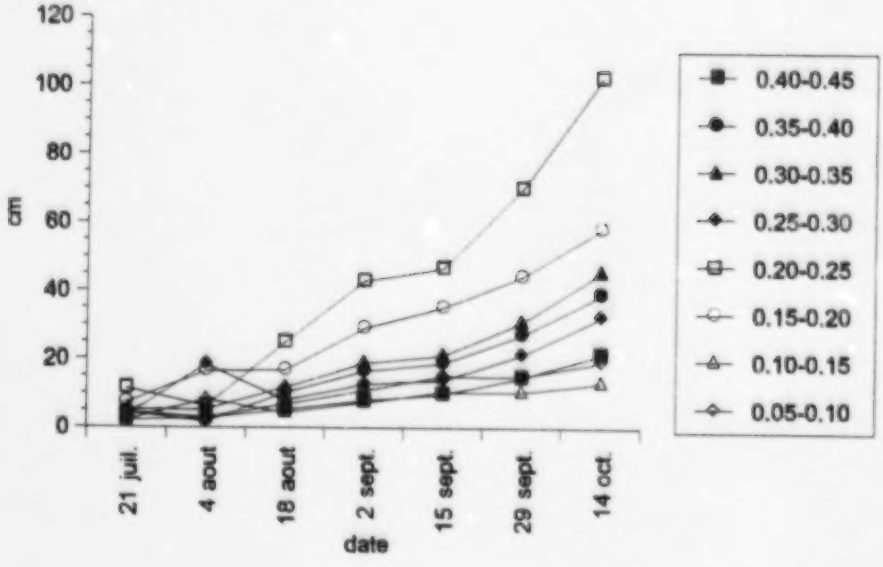


Figure 2. Progression de la hauteur, du diamètre, de la masse sèche des parties aériennes et de la masse sèche des racines de semis d'épinette blanche 1+0 et d'épinette noire 1+0 cultivés en tunnel dans le récipient à parois ajourées *IPL 25-350A*.



a : Épinette blanche



b : Épinette noire

Figure 3. Variation de la longueur des classes de diamètre de racines de 0,05 mm à 0,45 mm de semis d'épinette blanche et d'épinette noire 1+0 cultivés en tunnel dans le récipient à parois ajourées *IPL 25-350A*.

Le second groupe est constitué d'une part des classes 0,15 mm, 0,25 mm et 0,40 mm et d'autre part des classes 0,30 mm et 0,35 mm. Pour ces cinq classes, les profils sont semblables : élongation lente jusqu'au 18 août puis plus soutenue du 2 septembre au 29 septembre. La fin de la saison se caractérise par un allongement plus lent des racines. Dans ce groupe, les classes de diamètre 0,30 mm et 0,35 mm se distinguent dès le 18 août par des longueurs de racines plus importantes. Finalement, le troisième groupe n'est constitué que de la classe de diamètre 0,20 mm qui se démarque nettement, dès le 18 août, avec un profil d'élongation accentué particulièrement entre le 2 septembre et le 29 septembre. À partir de cette date, l'élongation ralentit tout en demeurant supérieure à celles des classes inférieures.

Les profils des longueurs des classes de diamètre supérieur (0,45 mm à 0,70 mm) sont semblables à ceux des classes inférieures particulièrement celles dont le diamètre varie de 0,15 mm à 0,40 mm (figure 4a). Les longueurs demeurent cependant peu importantes. Les racines plus grosses (classe 0,75 m et plus) ont un profil qui s'apparente à celui des classes de petits diamètres (0,05 mm et 0,10 mm) et représentent une très faible portion des racines produites par le plant. Sauf pour les plus grosses racines, la période active d'élongation s'échelonne du 2 au 29 septembre. À cette date, toute élongation cesse sauf pour les grosses racines qui s'accroissent légèrement jusqu'à la fin de la saison. Le tableau 1 précise que les racines regroupant d'une part les classes de diamètre 0,05 mm à 0,45 mm et d'autre part les classes de diamètre supérieures à 0,45 mm progressent régulièrement au cours de la saison. Leurs poids relatifs, soit approximativement 75 % et 25 %, varient peu pendant la saison.

2.2 L'épinette noire

Tout comme pour l'épinette blanche, on observe un faible allongement des classes de racines de petits diamètres (0,05 mm et 0,10 mm) particulièrement à partir du 2 septembre (figure 3b). Les classes 0,25 mm à 0,40 mm présentent globalement des profils d'élongation semblables sauf la classe 0,25 mm entre le 21 juillet et le 18 août. La classe 0,15 mm se démarque des classes inférieures par l'importance des longueurs et par un profil plus linéaire. Elle demeure plus importante que chez l'épinette blanche. Finalement, tout comme on l'a noté chez l'épinette blanche, c'est la classe 0,20 mm qui prédomine, particulièrement du 15 septembre au 14 octobre. De plus, pour l'ensemble des classes, on observe que l'élongation se maintient jusqu'à la mi-octobre, constatation qui apparaît plutôt à la fin septembre chez l'épinette blanche.

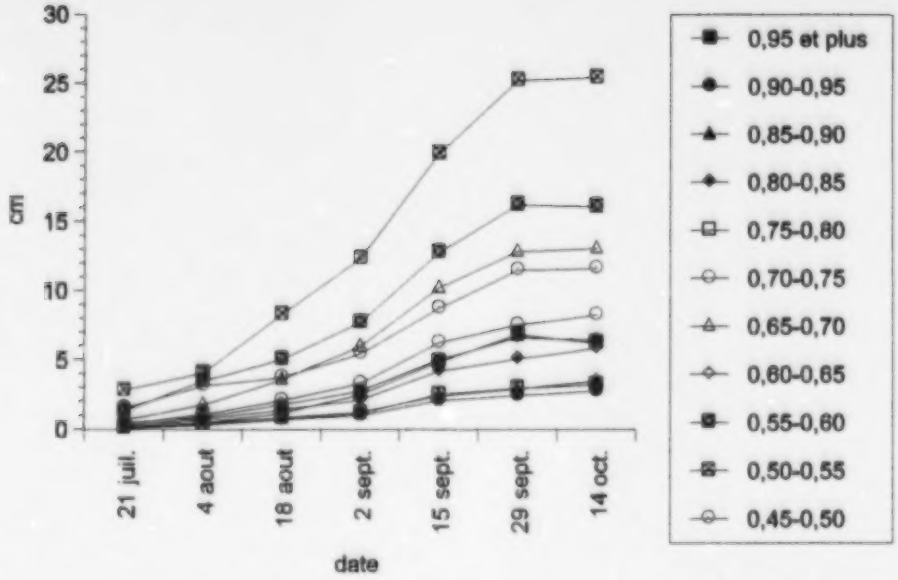
Les profils des longueurs des classes de diamètre de racines supérieures à 0,45 mm sont semblables à ceux des classes inférieures. Pour toutes ces classes, on observe une augmentation de l'élongation, particulièrement à partir du 15 septembre jusqu'à la fin de la saison. Cette remarque est aussi valable pour la classe 0,50 mm du 4 août au 18 août. Tout comme cela a été observé chez l'épinette blanche, les plus grosses racines (0,70 mm et plus) représentent une portion minime de toutes les racines du semis. Cependant, contrairement à l'épinette blanche, la proportion des racines de diamètres supérieurs à 0,45 mm tend graduellement à augmenter comparativement à celle des classes inférieures (0,05 à 0,45 mm) (tableau 1). En fin de saison, on observe proportionnellement deux fois moins de grosses racines (>0,45 mm) chez l'épinette noire que chez l'épinette blanche.

Discussion

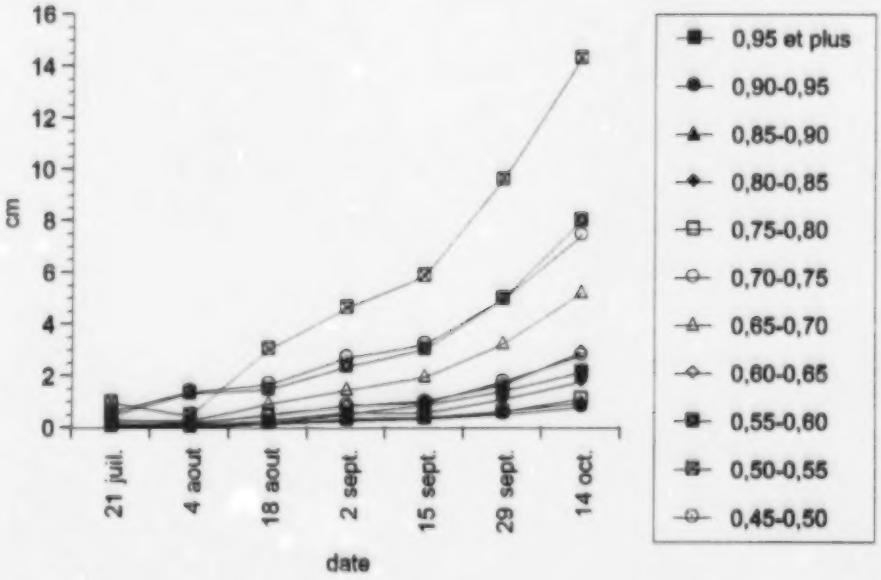
Les profils saisonniers de la hauteur, du diamètre et de la masse de la partie aérienne de semis d'épinette blanche et d'épinette noire au cours de la première saison de croissance sont caractéristiques. Certains auteurs ont noté des tendances semblables chez le genre *Picea* (Langlois 1984).

Au cours de cette expérience, on observe que la masse des racines de l'épinette blanche et de l'épinette noire croît tardivement, une caractéristique propre aux essences résineuses produites en pépinière (Paillé et Brown 1980, Langlois 1984). Plus spécifiquement chez l'épinette blanche, Langlois (1984) souligne que ce processus débute dès l'arrêt de la croissance en hauteur du semis au début de septembre, fait observé au cours de cette expérience. La diminution de la croissance de la masse des racines d'épinette blanche à la fin de la saison est caractéristique et peut être causée par la baisse progressive des températures (Langlois 1990). Cette situation ne prévaut cependant pas chez l'épinette noire, essence dont la croissance des racines demeure soutenue jusqu'à la fin de la saison (Langlois 1984).

L'analyse dynamique de l'élongation de 19 classes de diamètre de racines permet d'identifier certaines classes dominantes qui participent activement à la croissance des racines d'épinette. Parmi les résultats les plus intéressants, on doit signaler la prédominance de la classe de diamètre 0,20 mm tant chez l'épinette blanche que chez l'épinette noire. La croissance active de cette classe pourrait éventuellement expliquer pourquoi les classes de diamètre 0,05 mm et 0,10 mm et de façon moindre la classe 0,15 mm présentent, chez ces deux essences, des profils d'élongation relativement faibles au cours de la saison. Abstraction faite des classes 0,05 mm et 0,10 mm ainsi que de certaines classes de grosses racines, toutes les classes participent à des degrés divers à l'élongation des racines surtout à partir du mois d'août. Tant sur le plan de l'importance relative de chaque classe que des longueurs produites, ces deux essences présentent des similitudes intéressantes. Cependant, l'analyse comparée des groupes de racines de petit diamètre (0,05 mm à 0,45 mm) et de diamètre plus gros (0,45 mm et plus) indique des particularités intéressantes malgré l'importante variabilité des résultats. Cette spécificité, malgré l'appartenance au même genre, pourrait être liée au développement morphologique différent au cours de la saison. Ainsi, l'arrêt de la croissance des racines d'épinette blanche entre le 2 et le 15 septembre semble synchronisé avec la fin de l'élongation de la tige alors que la diminution de l'élongation à la fin du mois de septembre pourrait être associée à l'arrêt de croissance du



a : Épinette blanche



b : Épinette noire

Figure 4. Variation de la longueur des classes de diamètre de racines 0,45 mm à 0,95 mm et plus de semis d'épinette blanche et d'épinette noire 1+0 cultivés en tunnel dans le récipient à parois ajourées *IPL 25-350A*.

Caractérisation des longueurs et du pourcentage des longueurs de deux groupes de classes de diamètre de racines d'épinette blanche et d'épinette noire au cours d'une saison de croissance

Date	EPB						EPN					
	Diamètre 0,05 à 0,45 mm			Diamètre 0,45 mm et plus			Diamètre 0,05 à 0,45 mm			Diamètre 0,45 mm et plus		
	Long. tot. (cm)		% long. tot.	Long. tot. (cm)		% long. tot.	Long. tot. (cm)		% long. tot.	Long. tot. (cm)		% long. tot.
	moy.	e.t.		moy.	e.t.		moy.	e.t.		moy.	e.t.	
21 juil.	26,23	11,05	75,57	7,51	4,52	24,43	39,84	18,60	93,05	2,98	2,46	6,95
04 août	45,31	29,06	73,25	16,55	10,95	26,75	66,19	28,82	94,21	4,07	2,65	5,79
18 août	73,39	33,54	71,60	29,11	14,35	28,40	87,60	42,60	90,69	8,99	7,11	9,31
02 sept.	121,13	59,62	72,74	45,40	24,03	27,26	145,69	76,68	90,73	14,89	10,09	9,27
15 sept.	216,52	121,62	73,34	78,73	39,42	26,66	170,06	89,34	90,16	18,57	13,12	9,84
29 sept.	311,83	143,73	75,74	99,84	44,77	24,26	232,51	108,36	88,14	30,39	19,85	11,56
14 oct.	355,65	158,01	77,68	102,17	41,25	22,32	330,02	141,27	87,44	47,41	23,89	12,56

moy. = moyenne

e.t. : écart type

diamètre de la tige. Pour l'épinette noire, le ralentissement de l'élongation des racines au début du mois de septembre semble lié à la diminution de croissance de la hauteur et du diamètre du semis. Cependant, aucun processus phénologique ne permet d'expliquer la réactivation de l'élongation des racines par la suite.

Neufeld *et al.* (1989), dans une étude sur le *Pinus elliottii*, notent que la nouvelle croissance de racines est particulièrement causée par le développement des classes de diamètre inférieures à 1 mm plutôt que par les racines de plus gros diamètres. Dans cette étude, bien qu'on observe une finesse apparente plus importante des racines de l'épinette noire comparativement à l'épinette blanche, les résultats indiquent que c'est plus spécifiquement une sous-représentation du groupe de racines de plus gros diamètres qui semble produire cet effet. Cependant, dans le groupe présentant les plus importantes longueurs de racines (0,05 mm à 0,40 mm), la variabilité des résultats permet difficilement d'établir des distinctions précises entre les deux essences.

L'analyse comparée des profils de masse sèche et des différentes classes de diamètre de racines fait ressortir des similitudes intéressantes entre les deux essences étudiées. Si on fait exception des classes de diamètre 0,05 – 0,10 mm et 0,10 – 0,15 mm, les masses et les longueurs des racines apparaissent intimement liées, toutes classes de diamètres confondues. Dans ce contexte, la masse sèche demeure donc un outil de gestion opérationnel intéressant en pépinière. Par contre, dans une perspective où on cherche à mieux quantifier l'effet de nouvelles techniques de culture sur le développement des racines, l'analyse d'image apparaît plus intéressante et prometteuse. En plantation, cette technique pourrait permettre de mieux comprendre, sous différentes conditions, le développement des racines au cours des premières années de croissance. Plusieurs auteurs ont déjà noté l'importance des caractéristiques des racines sur la survie et sur la croissance des semis en plantation (Burdett *et al.* 1983, Carlson 1986, Balisky *et al.* 1995).

Au plan technique, la coloration des racines d'épinette avant la numérisation est une étape obligatoire pour permettre l'identification de tous les tissus et plus particulièrement des apex, une des parties des racines les plus difficiles à contraster dans une analyse de l'image. Doty *et al.* (1994) et Harris et Campbell (1989) remarquent que les racines caractérisées par une transparence élevée sont particulièrement difficiles à distinguer de l'arrière-plan au moment de la numérisation. Sur le terrain, Ruark et Bockheim (1988) procèdent à une coloration des racines avec de la *Rhodamine WT* afin d'accroître les contrastes avant la prise des photos. Notons cependant que l'utilisation de fuchsine au cours de cette expérience ne permet pas d'établir de distinction entre les racines vivantes et les tissus morts. D'autres fixateurs comme le *Trypan* bleu pourraient éventuellement y arriver (Ottman et Tim 1984).

À la résolution retenue, soit 197 pixels.cm^{-1} (500 *dpi*), définition supérieure à celle utilisée par d'autres chercheurs sur des tissus semblables (Pan et Bolton 1991, Doty *et al.* 1994), l'analyse des images numérisées est rapide et précise, comme l'ont noté Ottman et Timm (1984) et Stutte (1990). Cependant, l'augmentation progressive du nombre de racines au cours de la saison accroît rapidement le temps d'analyse. Cette contrainte pourrait éventuellement limiter l'application de cette technique à des racines de semis de petite taille. D'autres systèmes utilisant par exemple des caméras vidéos pourraient éventuellement résoudre ce problème (Whilhoit *et al.* 1993). À court terme, la diminution de la résolution (pixels) et l'utilisation d'un système informatique plus performant semblent être les deux améliorations qui réduisent sensiblement les temps d'analyse.

Conclusion

La commercialisation de systèmes de reconnaissance d'images appliqués à la caractérisation du matériel végétal offre des possibilités intéressantes à court terme et à moyen terme. Deux facteurs ont plus particulièrement permis cet important développement : des numériseurs efficaces et des systèmes informatiques performants d'une part et des programmes d'analyse d'images mieux adaptés à l'étude des tissus végétaux d'autre part. Dans le domaine de la recherche en production de plants, cette technologie peut être aisément intégrée à l'intérieur d'une procédure d'analyse en laboratoire puisque les manipulations sont faciles et rapides. Il est donc maintenant possible d'analyser une quantité importante de plants en continu, ce qui est un facteur intéressant dans un contexte où les protocoles expérimentaux nécessitent le traitement d'un grand nombre de plants.

Cette étude a permis d'acquérir des connaissances intéressantes sur les profils de développement des racines de jeunes semis d'épinette. Dans un contexte où des ressources importantes sont actuellement investies dans l'amélioration de l'architecture des racines en pépinière, la mise au point d'un outil qui permet de mieux quantifier l'effet de traitements spécifiques sur cette importante composante du plant s'avère donc importante. Bien que cette technique cause la destruction du matériel biologique et nécessite de colorer les tissus, elle demeure particulièrement bien adaptée à l'étude quantitative des racines juvéniles. La capacité réduite de ce système à pouvoir analyser des systèmes radiculaires plus importants pourrait éventuellement être résolue en améliorant la performance des systèmes informatiques. Comme les analyses en teintes de gris ne permettent pas de distinguer les tissus morts des tissus vivants, l'emploi de la version professionnelle du logiciel *Winrhizo*, qui fonctionne avec des couleurs de référence, permettrait peut-être d'établir cette distinction.

À moyen terme, cet outil pourrait avoir des applications intéressantes en plantation, particulièrement au cours des premières années. Ainsi, la caractérisation fine du développement des racines permettrait de mieux approfondir les connaissances sur la croissance des semis en plantation et de modifier éventuellement certaines approches culturales en pépinière.

Remerciements

Cette recherche opérationnelle a été menée dans le cadre du projet 0894-271S : Développement d'un outil de gestion de l'irrigation en pépinière. Pour la réalisation de cette expérience, nous tenons à remercier plus particulièrement l'équipe technique de la pépinière de Grandes-Piles qui nous a offert un soutien constant au cours de cette expérience. Nous adressons aussi des remerciements particuliers à M. Guy Prégent (MRN) et à Mme Chantal Hamel (Campus Macdonald) qui ont aimablement révisé ce texte. Finalement nous remercions Mesdames Sylvie Bourassa, Lorraine Parent et Nicole Durand pour la mise en page de ce document, M. Lévis Beaulieu pour la numérisation d'images et M. Fabien Caron pour la révision complète et l'édition du texte final.

Références bibliographiques

Balisky, A.C., P. Salonius, C. Walli et D. Brinkmann, 1995. *Seedling roots and forest floor : misplaced and neglected aspects of British Columbia's reforestation effort ?* The Forestry Chronicle 71(1) : 59-65.

Biernbaum, J.A., 1992. *Root-zone management of greenhouse container-grown crops to control water and fertilizer use.* Hort Technology 2(1) : 127-132.

Bottomley, P.A., H.H. Rogers et T.H. Foster, 1986. *NMR imaging shows water distribution and transport in plant root systems in situ.* Proc. Natl. Acad. Sci. 83 : 87-89.

Brown, D.P., T.K. Pratum, C. Bledsoe, E.D. Ford, S. Cothern et D. Perry, 1991. *Noninvasive studies of conifer roots : nuclear magnetic resonance (NMR) imaging of Douglas-fir seedlings.* Can. J. For. Res. 21 : 1559-1566.

Burdett, A.N. D.G. Simpson et C.F. Thompson, 1983. *Root development and plantation establishment success.* Plant and Soil. 71 : 103-110.

Carlson, W.C., 1986. *Root system considerations in the quality of loblolly pine seedlings.* South J. Appl. For. 10 : 87-92.

Doty, J.A., A.C. Kennedy et W.L. Pan, 1994. *Rapid bioassay for inhibitory* Rhizobacteria *using digital image analysis.* Soil. Sci. Am. J. 58 : 1699-1701.

Gingras, B,-M., et S. Richard, 1999. *Bilan du développement des récipients à parois ajourées : culture des semis en pépinière et performance en plantation.* Gouv. du Québec, min. des Ressources naturelles, Dir. de la rech. for. Mémoire de recherche forestière nº 130. 74 p.

Haase, D.L. et R. Rose, 1994. *Effects of soil water content and initial root volume on the nutrient status of 2+0 Douglas fir seedlings.* New Forests 8 : 265-277.

Harris, G.A. et G.S. Campbell, 1989. *Automated quantification of roots using a single image analyzer.* Agron. J. 81 : 935-938.

Langlois, C.G. 1985. *La culture en récipients – croissance, conditions culturales et fertilisation.* Dans : Deuxième atelier de travail sur la culture des semis en récipients. MER, SCF et OIFQ : 36-64.

Langlois, C.G., 1990. *Le dynamisme de la croissance des plants cultivés dans le récipient 45-110 et les relations entre les variables.* Dans : Troisième atelier québécois sur la culture des plants forestiers en récipients. MER (Forêts), Dir. rech. et dév., S. transf. technol. : 1-24.

Liang, J., J. Zhang et M.H. Wong, 1996. *Effects of air-filled soil porosity and aeration on the initiation and growth of secondary roots of maize (*Zea mays*).* Plant and Soil 186 : 245-254.

Ludovici, K.H. et L.A. Morris, 1995. *Responses of loblolly pine, sweetgum and crab grass roots to localized increases in nitrogen in two watering regimes.* Dans : M.A. Topa, P.T. Rygiewicx et J R.J. Cummong, éd. Dynamics of physiological processes in woody roots. Papers presented at an international symposium held in Ithaca, New York, 8-11 October. Tree Physiology 16(11/12) : 933-939.

Neufeld, H.S., D.M. Durall, P.M. Rich et David T. Tingey, 1989. *A root box for quantitative observations on intact entire root systems.* Plant and Soil 117 : 295-298.

Ottman, M.J. et H. Timm, 1984. *Measurement of viable plant roots with the image analyzing computer.* Agr. J. 76 : 1018-1020.

Pagès, L., 1992. *Mini-rhizotrons transparents pour l'étude du système radiculaire de jeunes plantes. Application à la caractérisation du développement radiculaire de jeunes chênes* (Quercus robur). Can. J. Bot. 70 : 1840-1847.

Paillé, G. et W.D.F. Brown, 1980. *La culture de semis en récipients chez CIP.* Dans : Atelier de travail sur la culture de semis en récipients, MER, SCF et OIFQ : 114-134.

Pan, W.L. et R.P. Bolton, 1991. *Root quantification by edge discrimination using a desktop scanner.* Agr. J. 83 : 1047-1052.

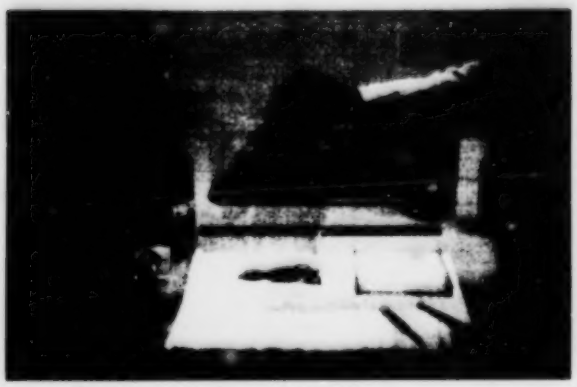
Ruark, G.A. et J.G. Bockheim, 1988. *Digital image analysis applied to soil profiles for estimating tree root biomass.* Soil Science 146(2) : 119-123.

Stutte, G.W., 1990. *Analysis of video images using an interactive image capture and analysis system.* Hort Science 25(6) : 695-697.

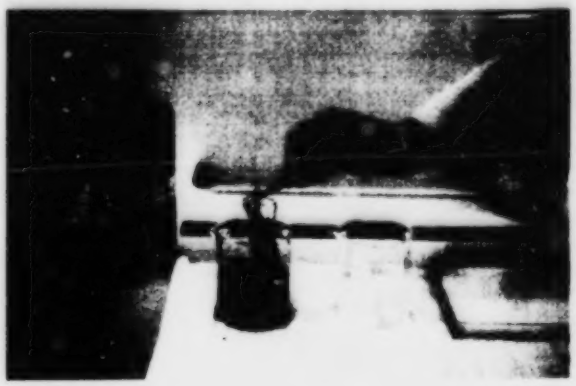
Tagliavia, M., L.J. Veto et N.E. Looney, 1993. *Measuring root surface area and mean root diameter of peach seedlings by digital image analysis.* Hort. Science, 28(11) : 1129-1130.

Wilhoit, J.H., L.J. Kutz, D.E. Fly et D.B. South, 1993. *Pine seedlings measured with a low cost machine vision system.* Alabama Agr. Exp. Sta., Highlights Agr. Res. 40(2) : 4.

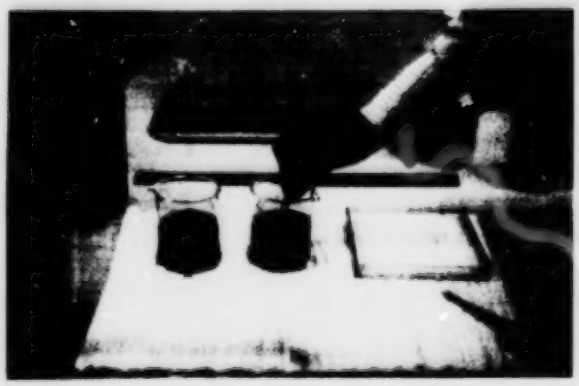
Annexe 1. Étapes de préparation des échantillons et de numérisation des racines de semis d'épinette en laboratoire



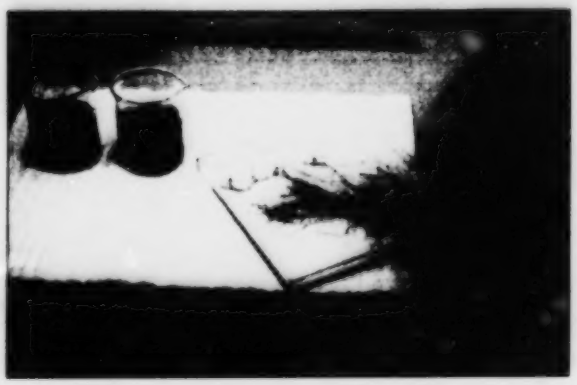
a-



-b-

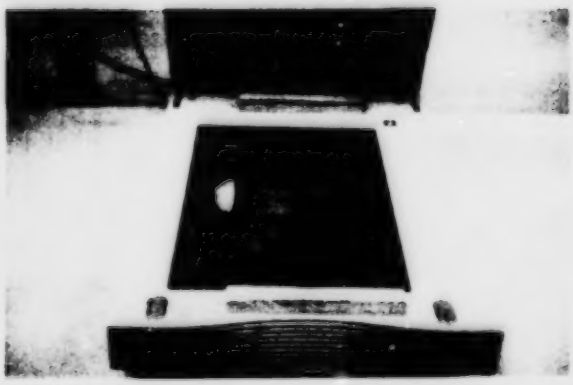


-c-



-d-

-e-



-f-

Annexe 2. Variation des longueurs de racines de l'épinette blanche produite en tunnel dans le récipient à parois ajourées *IPL 25-350A*

Classe de diamètre de racine (mm)	21 juillet		4 août		18 août		2 septembre		15 septembre		29 septembre		14 octobre	
	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.
0,05 – 0,10	2,09	1,08	2,20	1,44	4,75	1,68	8,14	4,12	13,24	8,36	17,91	7,42	20,39	10,34
0,10 – 0,15	0,59	0,31	1,38	1,18	1,55	0,67	3,31	1,86	5,59	3,12	9,10	4,56	10,26	6,83
0,15 – 0,20	1,24	0,84	3,08	2,33	4,41	2,46	9,92	6,66	20,92	13,37	35,53	20,14	42,64	29,18
0,20 – 0,25	3,81	2,60	6,38	4,32	14,35	8,66	27,46	16,20	56,92	39,14	86,07	42,86	102,56	47,90
0,25 – 0,30	2,27	1,32	8,43	7,77	7,78	3,74	12,71	6,39	23,29	14,23	32,89	15,46	39,27	15,37
0,30 – 0,35	5,31	2,46	8,14	2,90	14,63	6,44	22,51	10,18	37,38	18,77	51,39	21,80	58,08	20,70
0,35 – 0,40	6,49	2,44	8,10	4,88	15,73	5,99	22,82	8,98	36,38	15,23	49,00	19,60	51,93	17,68
0,40 – 0,45	4,43	1,99	6,79	2,98	10,19	3,90	14,27	5,23	22,80	9,40	29,94	11,89	30,59	10,01
0,45 – 0,50	1,49	0,71	3,11	1,62	3,70	1,55	5,42	2,17	8,71	3,65	11,46	4,73	11,59	3,88
0,50 – 0,55	2,80	1,44	4,02	2,53	8,26	3,18	12,32	4,97	19,91	7,79	25,21	9,69	25,42	8,90
0,55 – 0,60	1,30	0,77	3,44	1,72	5,01	2,36	7,70	4,19	12,74	5,25	16,18	6,54	16,05	5,46
0,60 – 0,65	0,44	0,29	0,84	0,50	1,78	0,92	2,74	1,54	4,97	2,31	6,61	3,27	6,38	2,29
0,65 – 0,70	0,66	0,39	1,75	0,96	3,54	1,87	5,97	3,45	10,20	4,76	12,80	5,74	13,04	5,20
0,70 – 0,75	0,32	0,26	1,03	0,76	2,06	1,13	3,29	2,23	6,23	3,75	7,50	3,69	8,24	3,79
0,75 – 0,80	0,10	0,11	0,49	0,42	0,77	0,52	1,14	0,88	2,47	1,69	2,92	1,71	3,20	1,70
0,80 – 0,85	0,15	0,20	0,72	0,73	1,37	0,91	2,13	1,47	4,18	2,88	5,06	2,91	5,83	3,08
0,85 – 0,90	0,08	0,09	0,43	0,70	0,79	0,54	1,20	0,88	2,41	1,90	2,88	1,89	3,45	1,97
0,90 – 0,95	0,07	0,09	0,28	0,42	0,70	0,52	0,99	0,73	2,07	1,95	2,42	1,34	2,75	1,79
0,95 et plus	0,11	0,17	0,46	0,59	1,13	0,88	2,50	1,52	4,84	3,49	6,79	3,26	6,21	3,19

Annexe 3. Variation des longueurs de racines de l'épinette noire produite en tunnel dans le récipient à parois ajourées *IPL 25-350A*

Classe de diamètre de racine (mm)	21 juillet		4 août		18 août		2 septembre		15 septembre		29 septembre		14 octobre	
	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.
0,05 – 0,10	4,46	2,10	2,83	1,36	6,73	3,26	10,83	6,11	14,95	9,18	14,85	10,88	19,16	10,92
0,10 – 0,15	2,08	1,07	8,14	4,10	4,29	2,20	7,31	4,13	10,26	6,12	10,34	7,12	12,99	8,64
0,15 – 0,20	7,17	3,57	16,34	6,83	16,72	8,60	28,98	14,68	35,08	21,47	44,09	22,56	57,98	33,26
0,20 – 0,25	11,33	4,96	6,23	2,86	24,88	11,50	42,85	19,39	46,54	24,08	69,88	29,13	102,19	40,92
0,25 – 0,30	3,38	1,82	18,28	7,87	7,99	3,49	12,67	5,05	13,78	6,41	21,19	8,72	32,26	10,93
0,30 – 0,35	5,01	2,29	5,22	1,70	11,69	4,79	18,73	7,23	21,00	9,13	30,68	11,80	45,40	14,57
0,35 – 0,40	4,41	1,60	1,65	0,72	10,16	5,32	16,49	6,42	18,75	7,96	27,00	11,13	38,76	13,46
0,40 – 0,45	1,99	1,19	2,77	1,29	5,15	3,40	7,83	3,67	9,69	4,99	14,49	7,02	21,30	8,57
0,45 – 0,50	0,62	0,60	1,37	0,67	1,66	1,22	2,69	1,50	3,20	1,89	4,94	2,86	7,42	3,04
0,50 – 0,55	0,96	0,60	0,47	0,30	3,02	2,36	4,62	2,61	5,86	3,73	9,58	5,62	14,28	6,63
0,55 – 0,60	0,49	0,38	1,32	0,73	1,48	1,11	2,35	1,53	3,02	2,24	4,96	3,20	8,00	4,06
0,60 – 0,65	0,15	0,12	0,14	0,14	0,51	0,42	0,85	0,53	1,02	0,83	1,65	1,16	2,90	1,76
0,65 – 0,70	0,29	0,24	0,25	0,24	0,93	0,67	1,46	1,11	1,95	1,60	3,23	2,43	5,20	3,49
0,70 – 0,75	0,14	0,14	0,18	0,20	0,48	0,38	0,87	0,68	0,96	0,79	1,75	1,39	2,79	2,05
0,75 – 0,80	0,05	0,05	0,12	0,14	0,16	0,16	0,31	0,33	0,36	0,32	0,61	0,50	1,12	0,92
0,80 – 0,85	0,10	0,09	0,09	0,09	0,27	0,23	0,59	0,62	0,58	0,44	1,10	0,90	1,79	1,60
0,85 – 0,90	0,06	0,07	0,04	0,06	0,16	0,16	0,35	0,40	0,39	0,34	0,63	0,53	0,97	0,83
0,90 – 0,95	0,04	0,05	0,02	0,03	0,15	0,21	0,27	0,27	0,35	0,29	0,52	0,40	0,80	0,77
0,95 et plus	0,09	0,12	0,05	0,08	0,17	0,18	0,53	0,51	0,88	0,65	1,42	0,86	2,14	1,74

Québec

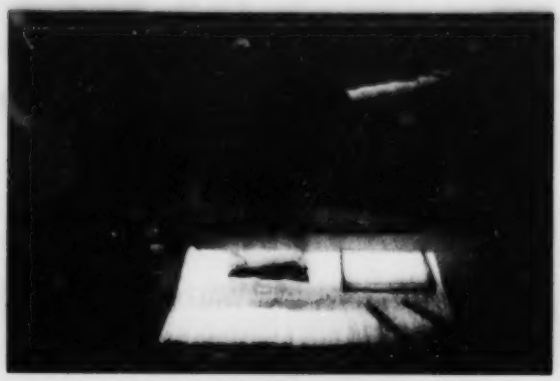
Ministère des
Ressources naturelles

RN99-3102

ISBN 2-550-35294-7
Dépôt légal 1999
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
© 1999 Gouvernement du Québec

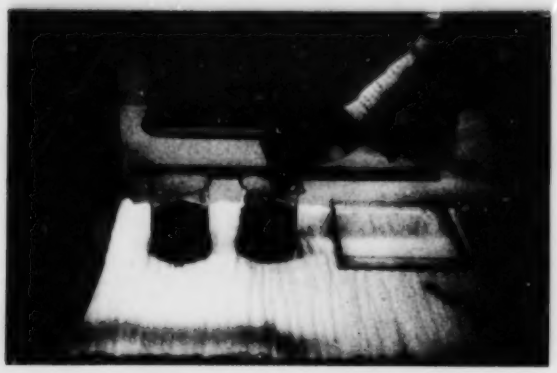
E R R A T A – Remplacer la page 12 par celle-ci

Annexe 1. Étapes de préparation des échantillons et de numérisation des racines de semis d'épinette en laboratoire

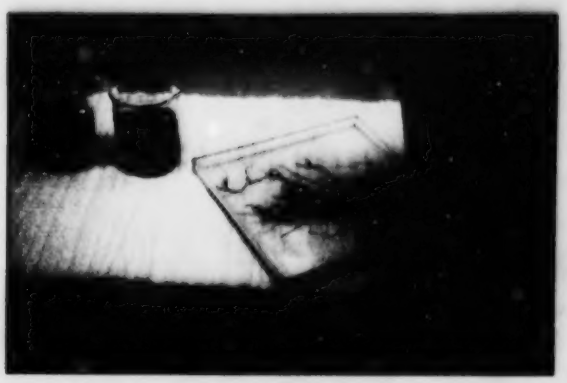


-a-

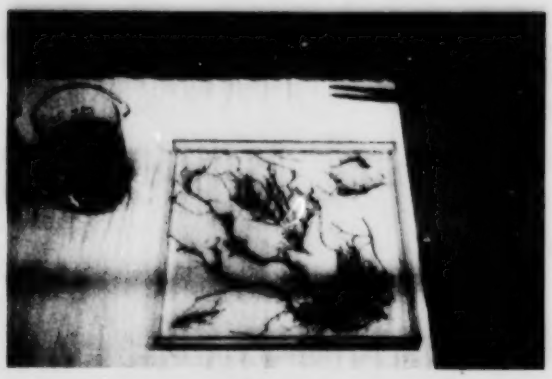
-b-



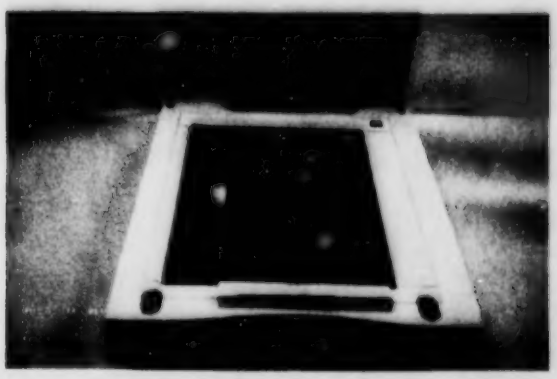
-c-



-d-



-e-



-f-